

Verfahren und Anordnung zur Kühlung eines Substrats, insbesondere eines Halbleiters

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Anordnung zur Kühlung eines Substrats. Als zu kühlendes Substrat dient bevorzugt ein Halbleiter, z. B. ein Mikroprozessor, ein Mikrocomputer oder dergleichen.

Aus der US 6 549 408 B2 kennt man eine Kühlanordnung für eine CPU. Auf dieser ist ein Verdampfer angeordnet, und Kühlmittel in diesem Verdampfer wird durch die Wärme der CPU verdampft und strömt dadurch in einer Steigleitung nach oben zu einem Kondensator, der auf einem höheren geodätischen Niveau angeordnet ist. Dort wird der Dampf gekühlt und verflüssigt und strömt unter der Wirkung der Schwerkraft durch ein Fallrohr zurück zum Verdampfer, wo er erneut verdampft wird.

Der Vorteil einer solchen Anordnung ist, dass sie ruhig läuft; nachteilig ist aber, dass es nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik hier unmöglich ist, eine Kühlmitteltemperatur unter der Umgebungstemperatur zu erreichen, weil Wärme nur von einem Medium höherer Temperatur zu einem Medium niedrigerer Temperatur strömt. Man erhält vielmehr eine Temperatur des Kühlmittels, die - wegen des notwendigen Temperaturgradienten zur Wärmeübertragung - mindestens 7 bis 10 K über der Umgebungstemperatur liegt, was die Wärmeabfuhr aus der CPU begrenzt, besonders an heißen Tagen. Außerdem ist der Gesamtwirkungsgrad eines solchen Systems nicht gut [$K = \text{Kelvin}$].

Es ist deshalb eine Aufgabe der Erfindung, ein neues Verfahren und eine neue Anordnung zur Kühlung eines Substrats bereitzustellen.

Nach der Erfindung wird diese Aufgabe gelöst durch das Verfahren gemäß Anspruch 1. Man erreicht hierdurch, dass das Kältemittel an der Wärmeübergangsfläche des Verdampfers im Wesentlichen in Form einer siedenden Flüssigkeit vorliegt, die von Nassdampf überlagert ist, so dass sich ein ausgezeichneter Wärmeübergang ergibt, der noch besser ist als bei einer

Flüssigkeitskühlung, wobei durch die hier mögliche höhere mittlere logarithmische Temperaturdifferenz der Wärmeübertragung auch tiefere Temperaturen des Substrats erreicht werden können. In dem Kältemittel im Verdampfer treten keine wesentlichen Temperaturdifferenzen auf, d. h. bei der Wärmeübertragung vom Substrat auf das Kältemittel findet nur eine geringe Überhitzung des Kältemittels statt, weil fast ausschließlich latente Wärme (durch Phasenumwandlung) übertragen wird. Damit ist eine weitgehend gleichmäßige und niedrige Verdampfertemperatur gewährleistet, und damit auch eine entsprechend gleichmäßige und niedrige Temperatur des zu kühlenden Substrats. Dies ermöglicht eine hohe Kühlleistung auf kleinem Raum.

Eine andere Lösung der gestellten Aufgabe ergibt sich durch eine Kühlanordnung gemäß Patentanspruch 5. Eine solche Kühlanordnung kann sehr kompakt und effizient ausgelegt werden und eignet sich deshalb z. B. sehr gut für Server und ähnliche Applikationen.

Weitere Einzelheiten und vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus dem im Folgenden beschriebenen und in der Zeichnung dargestellten, in keiner Weise als Einschränkung der Erfindung zu verstehenden Ausführungsbeispiel, sowie aus den Unteransprüchen. Es zeigt:

Fig. 1 eine Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Kälteanordnung, gesehen längs der Linie I-I der Fig. 2,

Fig. 2 eine andere Darstellung der Anordnung nach Fig. 1,

Fig. 3 eine schematische Darstellung des Kältekreislaufs bei der Anordnung nach Fig. 1 und 2,

Fig. 4 eine Darstellung des Kreisprozesses unter Verwendung von Kältemittel im lg-p/h-Diagramm, wobei ein erheblich verbesserter Wärmestrom vom Substrat zum Kältemittel möglich ist,

Fig. 5 ein Diagramm, welches den Verlauf der Temperatur im Verlauf des Kreisprozesses zeigt, und

Fig. 6 einen Schnitt durch eine bevorzugte Ausführungsform eines Hochleistungsverdampfers, der lageunabhängig betrieben werden kann.

Fig. 1 zeigt schematisch einen Schnitt durch eine bevorzugte Ausführungsform einer Kühlvorrichtung nach der Erfindung. Ein zu kühlendes Bauteil 12 ist in Fig. 1 und 2 schematisch angedeutet, z.B. ein Mikroprozessor, dessen im Betrieb entstehende Wärme bei einer niedrigen, gleichmäßigen Temperatur abgeführt werden soll, um ein zuverlässiges Arbeiten und eine hohe Lebensdauer bei hoher Wärmeabgabe in kompakter Bauweise zu ermöglichen. Das Bauteil 12 ist gewöhnlich in einem Träger 12a angeordnet, der zum elektrischen Anschluss dient.

Ein Lüfter 20 hat ein Lüftergehäuse 22, einen an diesem über eine Mehrzahl von Speichen 24 befestigten Stator 26, und einen Rotor 28 mit Lüfterflügeln.

Ein Kältemittelkompressor 32 hat eine mit dem Rotor 28 des Lüfters 20 verbundene Magnetglocke 34, ferner ein Kompressorgehäuse 36 und einen schematisch angedeuteten Verdichterrotor 38, sowie einen Antriebsmotor 42, bevorzugt einen kollektorlosen Motor mit regelbarer Drehzahl.

Das Kompressorgehäuse 36 ist über eine Haltespinne 40 mit dem Lüftergehäuse 22 zu einer Baugruppe verbunden. Alternativ kann der Kompressor 32 auf der gegenüberliegenden Seite des Lüfters 20, also dessen Flanschseite, angeordnet werden.

Ein Kondensator 44 ist auf der dem Kompressor 32 gegenüber liegenden Seite mit der von Lüfter 20 und Kompressor 32 gebildeten Baugruppe verbunden, so dass die vom Lüfter 20 geförderte Luft durch den Kondensator 28 hindurch strömt und diesen kühlt. Alternativ könnte der Kondensator 44 auch auf der Seite des Kompressors 32 angeordnet sein.

Der Kompressor 32 wird über die Magnetglocke 34 (magnetische Kupplung) vom Rotor 28 des Lüfters 20 angetrieben. (Alternativ kann der Lüfterrotor 28 über eine magnetische Kupplung vom Rotor eines Antriebsmotors für den Kompressor 32 angetrieben werden.) Die Magnetglocke 34 ist mit dem Rotor 28 fest verbunden. Das Kompressorgehäuse 36 wird von der Haltespinne 40 gehalten, so dass es sich nicht mit der Magnetglocke 34 drehen kann. Der Verdichterrotor 38 ist im Gehäuse

36 drehbar gelagert. Ebenso ist die Magnetglocke 34 durch das Verdichtergehäuse 36 gelagert.

Bei einer Drehung der Magnetglocke 34 durch den Motor 42 des Lüfters 20 wird somit der Verdichterrotor 38 mit bewegt und bewirkt eine Verdichtung des Kältemittels 52.

Bevorzugt hat die Kühlvorrichtung einen Drehzahlregler 54 (Fig. 2) zur Regelung der Drehzahl des Lüfters 20 und/oder des Verdichters 32. Die Solldrehzahl für den Drehzahlregler wird bevorzugt in Abhängigkeit von einem Temperaturwert bestimmt, welcher mittels eines Temperatursensors 56 ermittelt wird, der z.B. am Bauteil 12 angeordnet sein kann.

Der Kompressor 32 saugt über eine Leitung 66 gesättigten Kältemitteldampf 52d bzw. geringfügig überhitzten Dampf aus einem Verdampfer 60 ab. Dadurch wird dem Kältemittel 52 im Verdampfer 60 die notwendige Verdampfungsenthalpie q_0 entzogen, vgl. Fig. 4. Eine weitere Zufuhr von Verdampfungsenthalpie q_0 erfolgt durch die Wärmeabgabe des zu kühlenden Substrats 12, z.B. eines zu kühlenden Mikroprozessors. Der Verdampfer 60 ist bevorzugt etwas größer als das Substrat 12.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Verdampfer 60, 60' in Fig. 1 und 2 nur in einer sehr stark schematisierten Form dargestellt sind, wie sie zum Verständnis der Erfindung dienlich ist.

Fig. 1 zeigt, wie im Verdampfer 60 in der Praxis eine Schichtung auftritt, d.h. an seinem Boden und direkt über dem zu kühlenden Bauteil 12 liegt mindestens bereichsweise siedendes Kältemittel 52a, also eine Flüssigkeit (ähnlich wie siedendes Wasser in einem Kochtopf), und darüber liegt Nassdampf 52d, vergleichbar dem Nassdampf in und über siedendem Wasser. Stellenweise kann gelegentlich auch überhitzter Dampf vorliegen, z. B. bei einer sehr starken lokalen Wärmeentwicklung im Substrat 12.

Da das Kältemittel an der Wärmeübertragungsfläche des Verdampfers 60 hauptsächlich als siedende Flüssigkeit 52a vorliegt, die überall den gleichen Druck p_v und damit (da im Nassdampfbereich) auch die gleiche Temperatur t_v hat, ist auch der Wärmedurchgangskoeffizient k sehr gut und im Wesentlichen über der

gesamten Wärmeübertragungsfläche gleich. Da auch die Temperatur t_v (und der Verdampfdruck p_v) im Verdampfer 60 niedrig gewählt werden kann, z. B. $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, erhält man eine sehr gute Kühlung des Substrats 12. Dabei kann t_v bevorzugt auf einen vorgegebenen Wert, z. B. auf $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, geregelt werden, um z.B. bei einem Prozessor 12 ständig eine hohe Taktfrequenz zu ermöglichen.

Die Kühlung des Substrats 12 kann noch verbessert werden, indem man den Verdampfer 60 entsprechend auslegt, z. B. dadurch, dass man in seinem Inneren Kühlrippen oder dergleichen vorsieht, welche die Wärmeübergangsfläche und/oder die Turbulenzen vergrößern, vgl. hierzu nachfolgend Fig. 6.

Da das Substrat 12 gewöhnlich in seiner Mitte die höchste Temperatur hat, kann es sehr vorteilhaft sein, das Kältemittel in der Mitte des Verdampfers 60 zuzuführen und am Rand des Verdampfers 60 zum Verdichter 32 abzusaugen. Diese Besonderheiten sind in Fig. 6 dargestellt. Es ist hier darauf hinzuweisen, dass es eine Reihe von vorteilhaften Bauformen für solche Verdampfer gibt, die im Rahmen der Erfindung mit Vorteil eingesetzt werden können, um eine besonders kompakte Bauweise und eine hocheffiziente Kühlung zu erreichen.

Bei der Kühlung entsteht ein Temperaturgradient zwischen dem Substrat 12, dem Verdampfer 60, und dem Kältemittel 52a, 52d im Verdampfer 60. Um eine sehr hohe Wärmestromdichte dQ/dt bei sehr kleinen Wärmeübertragungsflächen zu erreichen, wird der Temperaturgradient in der Weise erhöht, dass die Temperatur in der Wärmesenke, also hier die Temperatur des Kältemittels 52a, 52d im Verdampfer 60, so weit wie nötig reduziert wird, da die maximale Mikroprozessortemperatur ja nach Typ begrenzt ist, so dass eine Erhöhung des Temperaturgradienten durch Erhöhung der Temperatur des Mikroprozessors gewöhnlich keine praktikable Alternative darstellt.

Die Verwendung eines Kältekreislaufs, wie er in den Fig. 3 bis 5 schematisch dargestellt ist, ermöglicht es, im Verdampfer 60 bei einer Umgebungstemperatur von $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ eine Temperatur t_v von z.B. $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu erhalten, also einen sehr hohen Temperaturgradienten und folglich einen sehr hohen Wärmestrom selbst bei kleinen Übergangsflächen. Nachfolgend wird dies anhand der Gleichung (1) nochmals erläutert.

Der Kompressor 32 verdichtet das angesaugte Kältemittel 52d bis auf einen Kondensationsdruck p_K , und dadurch ergibt sich an seinem Ausgang eine Temperatur t_2 (Fig. 5), die deutlich über der jeweiligen Umgebungstemperatur t_u (Fig. 5) liegt. Das verdichtete, überhitzte Kältemittel 52b (Fig. 2) wird über eine Leitung 68 zum Kondensator 44 und durch diesen geführt, damit es dort Wärme abgeben kann und kondensiert.

Der Lüfter 20 bläst oder saugt Luft (mit Umgebungstemperatur t_u) durch die Luftseite des Kondensators 44, und diese Luft kühlt den Kondensator 44 und damit auch das überhitzte Kältemittel 52b in diesem. Dabei wird dem Kältemittel 52b so viel Wärme q (vgl. Fig. 4) entzogen, dass es vollständig kondensiert und ggf. noch leicht unterkühlt wird, z.B. um 5 K. Das Kältemittelkondensat ist mit 52c bezeichnet. Es befindet sich noch etwa auf dem hohen Kondensationsdruck p_K (Fig. 4), also dem Punkt 3 der Fig. 3 und 4, wozu eine entsprechend hohe Temperatur t_K von z.B. 45° C gehört. Über die Leitung 64 wird dieses Kondensat 52c einem Drosselventil 62 zugeführt und darin isenthalp, also mit im Wesentlichen gleichbleibender Enthalpie, auf den Verdampfungsdruck p_V entspannt, vgl. den Punkt 4 in Fig. 4. Diesem Verdampfungsdruck p_V ist eine entsprechend niedrige Verdampfer Temperatur t_V von z.B. -10° C zugeordnet, wie sie für die Kühlung des Substrats 12 verwendet wird.

Statt eines einzigen Verdampfers 60 können z.B. zwei Verdampfer 60, 60' verwendet werden, die bevorzugt parallel geschaltet sind, aber auch in Serie geschaltet sein können, vgl. Fig. 3.

Fig. 3 zeigt den Kältekreislauf in schematischer Darstellung als Schaltbild. Da ein Kältemittel 52 verwendet wird, z.B. 1,1,1,2-Tetrafluorethan, Handelsbezeichnung H-FKW134a oder R234a, oder z.B. das Kältemittel R600a, liegt dieses im Kreislauf gemäß Fig. 3 in zwei Phasen vor, nämlich gasförmig und flüssig. In den Verdampfern 60, 60' liegt das Kältemittel 52 als Nassdampf (zusammengesetzt aus siedender Flüssigkeit 52a und Sattdampf, ggf. noch mit leicht überhitztem Dampf) vor. Im Kondensator 44 liegt das Kältemittel als überhitzter Dampf und als Nassdampf sowie als unterkühlte Flüssigkeit vor. Dies sind in Fig. 3 und 4 die Abschnitte zwischen den Punkten, die mit den Ziffern 2 und 3 (Kondensator 44) bzw. 4 und 1 (Verdampfer 60) gekennzeichnet sind. Dabei erhält man zwischen den Punkten 2 und 3 einen Abschnitt mit im Wesentlichen konstantem Druck p_K . Damit

ist ein erheblich verbesserter Wärmeübergang vom Verdampfer 60, 60' auf das dortige Kältemittel 52a realisierbar, also ein verbessertes α , und damit eine erheblich höhere Wärmestromdichte, insbesondere von der Wärmequelle 12 auf den oder die Verdampfer 60, 60' bei unveränderter Temperatur der Wärmequelle 12.

In der Drossel 62 erfolgt eine isenthalpe Zustandsänderung, vgl. im Diagramm der Fig. 4 die vertikale Linie zwischen den Punkten 3 und 4, d.h. es wird keine Energie zu- oder abgeführt, sondern es werden nur Druck und Temperatur des Kältemittels auf das niedrigere Niveau im Verdampfer 60 reduziert. Der Aggregatzustand des unterkühlten Kältemittelkondensats 52c ändert sich dabei ebenfalls von unterkühlter Flüssigkeit (Punkt 3 in Fig. 3 und 4) zu Nassdampf (Punkt 4 in Fig. 3 und 4). Es handelt sich also, wie in Fig. 4 dargestellt, um einen links drehenden Kreisprozess. Der Buchstabe h bezeichnet dort die Enthalpie, gemessen in kJ/kg Kältemittel, und der Buchstabe p bezeichnet den Druck in bar.

In Fig. 4 bezeichnet 70 die Siedelinie, die ein Gebiet 72 reiner Flüssigkeit trennt von einem Nassdampfgebiet 74. Mit 76 ist die Taulinie bezeichnet, die das Gebiet 74 vom Heißdampfgebiet 78 trennt. Mit 80 ist der so genannte kritische Punkt bezeichnet. Im Bereich oberhalb des Punktes 80 ist keine exakte Trennung zwischen Flüssigkeit und Heißdampf mehr möglich. Die zugehörige kritische Temperatur begrenzt folglich den Einsatzbereich des ausgewählten Kältemittels.

Die Temperaturen der Verdampfer 60, 60' können hierbei variiert und auch unter die Umgebungstemperatur abgesenkt werden. Damit ist eine weitere erhebliche Erhöhung der Wärmestromdichte von der Wärmequelle 12 auf einen Verdampfer 60, 60' realisierbar, ohne dass man dazu die Temperatur der Wärmequelle 12 erhöhen muss. Bei Absenkung der Verdampfer-Temperatur t_v unter die Taupunkt-Temperatur der umgebenden Luft ist eine Kälteisolation 86 der kalten Bauelemente zweckmäßig, also wie dargestellt des Drosselventils 62, des Verdampfers 60 und der Verbindungsleitung 66 bis zum Kompressor 32. Hierdurch wird vermieden, dass Wasser aus der Umgebungsluft an den kalten Bauelementen auskondensiert, was zu Schwierigkeiten an elektrischen Bauteilen führen könnte.

Das Kältemittel 52a, 52d liegt im Verdampfer 60 bei im Wesentlichen gleich bleibender Temperatur vor, d.h. bei der Wärmeübertragung tritt kein wesentlicher

Temperaturgradient des Kältemittels 52 selbst auf, von einer geringen Überhitzung im Verdampfer 60 abgesehen (z.B. um 5 K), weil hier fast ausschließlich latente Wärme (Phasenumwandlung) übertragen wird. Damit ist eine weitgehend gleichmäßige und niedrige Temperatur der Verdampfer 60, 60' gewährleistet, wie sie für eine zuverlässige Kühlung von Halbleiter-Substraten angestrebt wird. Dazu trägt auch bei, dass gemäß der Darstellung in Fig. 1 und 6 die Wärmeübertragungsflächen der Verdampfer 60 bzw. 100 hauptsächlich mit siedender Flüssigkeit 52a bedeckt sind.

Fig. 5 zeigt den Verlauf der Temperatur über dem Weg L im Kältekreislauf. Der Weg L ist in Fig. 3 symbolisch eingezeichnet und so zu denken, dass ein Beobachter mit dem Kältemittel mitwandert und am Ende wieder an seinen Ausgangspunkt zurück gelangt. Es handelt sich hier um eine Darstellungsart, die für solche Systeme gebräuchlich ist. Die Punkte 1, 2, 3 und 4 sind dieselben, wie sie in den vorhergehenden Figuren angegeben sind.

Am Punkt 4, nämlich dem Eintritt in den Verdampfer 60, 60', hat das Kältemittel seine niedrigste Temperatur t_v (Verdampfertemperatur), z.B. $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, d. h. es liegt hauptsächlich als Nassdampf vor, was für die Wärmeübertragung sehr günstig ist. Unter Nassdampf versteht man ein Gemisch aus siedender Flüssigkeit und gesättigten Dampf. Ein anschauliches Bild für Nassdampf ist ein Kochtopf mit siedendem Wasser bei normalem Luftdruck. Das siedende Wasser behält seine Temperatur von $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei, bis es komplett verdampft ist. Vgl. hierzu Fig. 5: In gleicher Weise behält hier das Kältemittel in einem Bereich 78 bis zum Erreichen einer Stelle 80, nämlich seiner Taulinie, diese Temperatur t_v von z. B. $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei, und im Bereich 82 zwischen der Stelle 80 und der Stelle 1 kann eine geringfügige Überhitzung des Nassdampfes stattfinden, z. B. um 5 K, wodurch die Temperatur des Kältemittels in diesem Bereich 82 etwas ansteigen kann. Da das Kältemittel hier im Wesentlichen als Nassdampf vorliegt, ist der Wärmedurchgangskoeffizient k erhöht, vgl. die nachfolgende Gleichung (1) und die Erläuterungen hierzu.

Zwischen den Punkten 1 und 2 ist der Kompressor 32 wirksam, der an der Stelle 2 einen entsprechenden Anstieg von Druck und Temperatur bewirkt, welche letztere am Ausgang des Kompressors 32 ihr Maximum t_2 erreicht. Dort liegt das Kältemittel als verdichteter überhitzter Dampf vor.

Zwischen den Stellen 2 und 3 strömt das Kältemittel durch den Kondensator 44. Dort wird es gekühlt, so dass seine Temperatur zunächst zwischen der Stelle 2 und einer Stelle 84, nämlich dem Erreichen der Taulinie, in einem Bereich 86 auf die Kondensationstemperatur t_k sinkt. Durch die fortgesetzte Wärmeabfuhr infolge der Kühlung im Kondensator 44 erfolgt zwischen den Stellen 84 und 90 eine vollständige Kondensation des Kältemittels bis zum Erreichen der Siedelinie 90, wobei dem Kältemittel eine entsprechende Wärmemenge q (Fig. 4) entzogen wird. Zwischen den Punkten 90 und 3 kann in einem Bereich 92 auch eine leichte Unterkühlung des Kältemittels stattfinden, z.B. um 5 K.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Kondensationstemperatur t_k deutlich, z. B. um 10 K, über der Umgebungstemperatur t_u liegt, was den Wärmeübergang vom Kondensator 44 auf die Umgebungsluft entsprechend verbessert, vgl. Fig. 5.

Zwischen den Stellen 3 und 4 durchströmt das kondensierte Kältemittel die Drossel 62, und an ihrem Ausgang ist seine Temperatur wieder auf die Verdampfertemperatur t_v gesunken, die z. B. -10 °C betragen kann und die in den Verdampfern 60, 60' aus den erläuterten Gründen im Bereich 78 praktisch konstant bleibt, wobei allenfalls im Bereich 82 durch Überhitzung ein kleiner Temperaturanstieg um 5 K erfolgen kann. Dies ermöglicht einen exzellenten Wärmeübergang vom Prozessor 12 auf das Kältemittel 52, da am Prozessor 12 ein hoher und im Wesentlichen konstanter Temperaturgradient vorliegt, so dass die Kühlung überall gleich gut ist. Wenn der Prozessor 12 z. B. eine Temperatur von $+60\text{ °C}$ und das Kältemittel eine Verdampfertemperatur t_v von -10 °C hat, ergibt sich ein im wesentlichen konstanter Temperaturgradient von 70 K, der eine exzellente Kühlung auch in einem kleinen Volumen ermöglicht.

Sehr vorteilhaft ist, dass eine niedrige Temperatur praktisch nur zwischen den Stellen 4 und 1 des Kältekreislaufes vorliegt, d. h. eine Wärmeisolation 86 ist nur in diesem Bereich erforderlich, nicht aber am Kondensator 44 oder am Kompressor 32. Dies ist eine Folge davon, dass der Kondensator 44 bei einer Kondensationstemperatur t_k arbeitet, die z.B. $+45\text{ °C}$ oder höher beträgt. Selbst bei einer geringfügigen Unterkühlung um 5 K im Bereich 92 kann dort die Temperatur immer noch auf $+40\text{ °C}$ gehalten werden, also über der Taupunkttemperatur der umgebenden Luft, so dass dort ein Auskondensieren von Feuchtigkeit aus der Luft nicht auftreten kann. Gerade in Anordnungen zur Kühlung von elektronischen

Bauelementen erscheint dies als sehr wichtig, weil dort auskondensierte Feuchtigkeit zu Fehlfunktionen führen könnte.

Mathematisch ausgedrückt berechnet sich der zu übertragende Wärmestrom als

$$dQ/dt = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m \quad \dots(1)$$

Dabei bedeuten:

dQ/dt = Wärmestrom in W

k = Wärmedurchgangskoeffizient in W/m^2K ;

A = Wärmeübertragungsfläche in m^2 ;

$\Delta\vartheta_m$ = mittlere logarithmische Temperaturdifferenz der Wärmeübertragung.

Bei der Erfindung hat die Wärmeübertragungsfläche A einen fixen Wert. Eine deutliche Erhöhung des Wärmestroms dQ/dt ergibt sich bei der Erfindung durch folgende Faktoren:

- a) Der Wärmedurchgangskoeffizient k ist deutlich erhöht, weil die Wärme im Wesentlichen im Nassdampfbereich übertragen wird.
- b) Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_m$ wird deutlich erhöht, weil die Verdampfertemperatur bis weit unter die Umgebungstemperatur abgesenkt werden kann, selbst bei feststehender Temperatur des Substrats 12 bzw. 106 (Fig. 6).

Fig. 6 zeigt einen Schnitt durch einen vorteilhaften Verdampfer 100. Dieser kann, bedingt durch seine Bauweise, im Wesentlichen lageunabhängig betrieben werden. Er arbeitet nach dem Prinzip einer Prallplatte, um eine hohe Wärmestromdichte zu erreichen.

Der Verdampfer 100 hat ein Oberteil 102, das gewöhnlich einstückig und als Spritzgussteil aus einem geeigneten Kunststoff hergestellt ist, und er hat eine Kälteplatte 104 aus einem geeigneten Metall, meistens Kupfer, die zur Anlage gegen ein wärmeerzeugendes Substrat 106 ausgebildet ist, das in einem Träger 108 (für die elektrischen Verbindungen des Substrats 106) angeordnet ist. Die Kälteplatte 104 kann z. B. als Fließpress-Teil aus Kupfer, Aluminium, Silber oder dgl. hergestellt werden. Dies ermöglicht es, die Kälteplatte 104 einfach und preiswert

herzustellen, während das Oberteil einen komplizierten Aufbau haben kann und trotzdem leicht herzustellen ist.

Die Kälteplatte 104 hat eine Wärme übertragende Fläche 110, welche eine hohe Oberflächengüte hat und vollflächig gegen das Substrat 106 anliegt, wobei gewöhnlich etwas Wärmeleitpaste 111 zwischen die Fläche 110 und das Substrat 106 eingefügt wird. Die Wärmezufuhr dq/dt vom Substrat 106 ist symbolisch durch Pfeile dargestellt, um den Wärmestrom zu verdeutlichen.

Das Oberteil 102 hat in seiner Mitte eine Zufuhrleitung 112, an deren unterem Ende sich bevorzugt Düsen 114 befinden. Durch die Zufuhrleitung 112 wird entspanntes Kältemittel 52 als Nassdampf zugeführt und durch die Düsen 114 auf die Kälteplatte 104 gespritzt. Hierdurch findet eine Erhöhung der Turbulenz und eine zusätzliche Verbesserung des Wärmeübergangs von der Kälteplatte 104 auf das Kältemittel 52 statt. Die Düsen 114 können z.B. Lochdüsen oder Schlitzdüsen sein.

Die Kälteplatte 104 hat eine muldenförmige Vertiefung 114, z. B. mit der Umrissform einer Kugelkalotte, eines Rotations-Paraboloids, einer Schale, oder dgl. Aus dieser Vertiefung 114 ragen nadelförmige Kühlkörper 116 nach oben bis zu einer Ebene 118, die parallel zur Fläche 110 verläuft, wie Fig. 6 klar zeigt. Die Kühlkörper 116 können je nach Bedarf auch als Rippen oder dgl. ausgebildet werden, wie das dem Fachmann bekannt ist, und ihre Höhe kann variiert werden.

Zwischen den nadelförmigen Kühlkörpern 116 befinden sich Kühlkanäle 120, und in diese wird der Nassdampf 52 nach Art einer Prallströmung gespritzt, so dass sich ein guter Wärmeübergang ergibt. Durch die Prallströmung kann auf engstem Raum eine sehr hohe Wärmestromdichte erreicht werden, die durch die niedrige Kältemitteltemperatur noch weiter erhöht wird. Durch die Düsen 114 ist eine Strahleinschnürung (Coanda-Effekt) möglich, die ebenfalls zur Verbesserung der Wärmeübertragung beiträgt.

Wie man sieht, spielt es beim Verdampfer 100 gemäß Fig. 6 keine Rolle, ob dieser exakt waagerecht steht oder eine leichte Schräglage hat, da sich hierdurch an der Wärmeübertragung von der Kälteplatte 104 auf den Nassdampf 52 nichts Wesentliches ändert. Dies stellt einen großen Vorteil der Anordnung nach Fig. 6 dar,

da in der Praxis nicht erwartet werden kann, dass z.B. ein Rechner, dessen Bestandteil der Mikroprozessor 106 ist, vollständig waagerecht aufgestellt wird.

Etwa konzentrisch zur Zufuhrleitung 112 ist auf der Unterseite 122 des Oberteils 102 eine ringförmige Blende 124 angeordnet, die nach unten ragt und bevorzugt gegen die oberen Enden der dortigen Kühlkörper 116 anliegt oder sogar etwas in die Kanäle 120 ragt. Dadurch wird der Nassdampf 52 gezwungen, vom Zentrum durch die Kanäle 120 in alle Richtungen radial nach außen zu strömen, was die Wärmeübertragung zusätzlich verbessert. Ohne die Blende 124 würde der Nassdampf 52 hauptsächlich direkt vom Einlass 112 zu einem Auslasskanal 126 strömen, und nicht zwischen den Kühlkörpern 116 hindurch.

Der Auslasskanal 126 ist im Oberteil 102 vorgesehen. Seine Mittelachse 128 verläuft etwa so, dass sie durch den äußeren Rand 130 der (bevorzugt kreisrunden) Kälteplatte 104 verläuft.

Das Oberteil 102 hat einen Fortsatz 132, der sich etwa rohrförmig, und etwa konzentrisch zum Einlass 112, nach unten erstreckt, und in diesem Fortsatz 132 ist die Kälteplatte 104 abgedichtet befestigt, z. B. mittels einer umlaufenden Dichtung 134 oder mittels Kleben, Schweißen, Löten oder dgl.

Wenn der Nassdampf 52 durch die Kanäle 120 zwischen den Kühlkörpern 116 strömt, verdampft er, so dass durch den Auslass 126 Sattedampf 52 oder überhitzter Dampf austritt. Gewöhnlich wird ein Trockner 138 nachgeschaltet, um mitgerissene Flüssigkeitsteilchen abzuscheiden, da diese den Kompressor 32 beschädigen könnten.

Der Verdampfer 100 hat auch eine integrierte umlaufende Montageplatte 140, mit der er auf einem Substrat 106 befestigt werden kann. Für die Befestigung können bekannte Befestigungsarten verwendet werden.

Naturgemäß sind im Rahmen der vorliegenden Erfindung vielfache Abwandlungen und Modifikationen möglich.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Kühlung eines Substrats mittels eines Kältemittels, welches Verfahren folgende Schritte aufweist:
In einem Kältekreislauf wird das Kältemittel verdichtet;
Das verdichtete Kältemittel wird durch Kühlung kondensiert;
Das kondensierte Kältemittel wird einem Entspannungsschritt unterworfen, um seinen Druck und seine Temperatur zu reduzieren, so dass es nach der Entspannung als siedende Flüssigkeit und als Nassdampf vorliegt;
siedende Flüssigkeit und Nassdampf werden einem Verdampfer zugeführt, der mit dem zu kühlenden Substrat in Wärmeverbindung steht;
Kältemittel aus dem Verdampfer wird erneut dem Schritt der Verdichtung unterworfen.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem das kondensierte Kältemittel beim Entspannungsschritt isenthalp entspannt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei welchem das verdichtete Kältemittel bei seiner Verdichtung auf eine Temperatur (t_2) erhitzt wird, die höher ist als die Temperatur eines zu seiner Kühlung dienenden Kühlmittels.
4. Verfahren nach Anspruch 3, bei welchem als Kühlmittel Umgebungsluft verwendet wird, und das Kältemittel bei seiner Verdichtung auf eine Temperatur (t_2) erwärmt wird, die höher ist als die Temperatur (t_0) dieser Umgebungsluft.
5. Kühlanordnung zur Kühlung eines Substrats nach Art einer Halbleiteranordnung, welche Kühlanordnung als Kaltdampf-Kältemaschine ausgebildet ist, in deren Kältekreislauf ein Kältemittelkompressor (32), ein Kondensator (44) zur Wärmeabgabe an Umgebungsluft, und ein Verdampfer (60) angeordnet sind, wobei dem Verdampfer ein Drosselventil (62) zur isenthalpen Entspannung des Kältemittels vorgeschaltet ist und der Verdampfer (60) als Wärmeaufnehmer zur Aufnahme von Wärme aus dem Substrat (12) ausgebildet ist.

6. Kühlanordnung nach Anspruch 5, bei welcher der Kondensator (44) mit einem Lüfter (20) und einem Antriebsmotor (42) für diesen zu einer Baueinheit vereinigt ist.
7. Kühlanordnung nach Anspruch 5 oder 6, bei welcher der Kreisprozess der Kaltdampf-Kältemaschine ein linksdrehender Kreisprozess ist.
8. Kühlanordnung nach einem der Ansprüche 5 bis 7, bei welcher das Kältemittel im Kreislauf in zwei Phasen vorliegt, nämlich gasförmig und flüssig.
9. Kühlanordnung nach einem der Ansprüche 5 bis 8, bei welcher die beiden Aggregate, nämlich Verdichter (32) und Lüfter (20), vom selben Antriebsmotor (42) antreibbar sind.
10. Kühlanordnung nach Anspruch 9, bei welcher der Antriebsmotor (42) eines der beiden Aggregate direkt und das andere über eine Magnetkupplung (34) antreibt.
11. Kühlanordnung nach einem der Ansprüche 5 bis 10, bei welcher im Betrieb das Kältemittel im Verdampfer (60; 60') im Wesentlichen in Form einer siedenden Flüssigkeit (52a) und von gesättigtem Kältemitteldampf (52d) vorliegt.
12. Kühlanordnung nach einem der Ansprüche 5 bis 11, bei welcher das Lüftergehäuse (22) und das Kompressorgehäuse (36) mindestens teilweise zu einer Baueinheit (40) vereinigt sind.
13. Kühlanordnung nach Anspruch 12, bei welcher die Baueinheit mindestens teilweise als Spritzgussteil (40) ausgebildet ist.
14. Kühlanordnung nach Anspruch 13, bei welcher das Spritzgussteil (40) mindestens teilweise aus einem geeigneten Kunststoff hergestellt ist.
15. Kühlanordnung nach einem der Ansprüche 5 bis 14, bei welcher ein Regler (54) zum Regeln der Temperatur (t_v) im Verdampfer (60, 60') vorgesehen ist.

16. Kühlanordnung nach Anspruch 15, bei welcher die Verdampfer Temperatur (t_v) durch Veränderung der Drehzahl des Lüfters (28) und/oder durch Veränderung der Drehzahl des Verdichters (32) regelbar ist.
17. Kühlanordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welcher der Verdampfer (100) nach dem Prinzip einer Prallplatte ausgebildet ist.
18. Kühlanordnung nach Anspruch 17, bei welcher an der Eintrittsstelle des Kältemittels (52) in den Verdampfer (100) eine Düsenanordnung (114) vorgesehen ist.
19. Kühlanordnung nach Anspruch 18, bei welcher die Düsenanordnung (114) eine Lochdüse aufweist.
20. Kühlanordnung nach Anspruch 18, bei welcher die Düsenanordnung (114) eine Schlitzdüse aufweist.
21. Kühlanordnung nach einem der Ansprüche 18 bis 20, bei welcher die Düsenanordnung zur Erzeugung einer Strahleinschnürung ausgebildet ist.
22. Kühlanordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welcher die wärmeübertragende Fläche (114) im Verdampfer (100) auf ihrer vom Wärme abgebenden Substrat (106) abgewandten Seite konkav ausgebildet ist.
23. Kühlanordnung nach Anspruch 22, bei welcher die konkave Fläche (114) etwa nach Art einer Kugelkalotte ausgebildet ist.
24. Kühlanordnung nach Anspruch 22, bei welcher die konkave Fläche (114) etwa nach Art eines Rotations-Paraboloids ausgebildet ist.
25. Kühlanordnung nach einem der Ansprüche 22 bis 24, bei welcher auf der konkaven Fläche (114) Wärmetauschelemente (116) mit Abständen (120) voneinander angeordnet sind.
26. Kühlanordnung nach Anspruch 25, bei welcher die Wärmetauschelemente mindestens teilweise nach Art von Nadeln (116) ausgebildet sind.

27. Kühlanordnung nach Anspruch 25 oder 26, bei welcher im Bereich um die Eintrittsstelle (114) des Kältemittels (52) in den Verdampfer (100) mindestens eine Sperre (124) vorgesehen ist, welche als Hindernis gegen eine direkte Strömung des Kältemittels (52) vom Einlass (112) zum Auslass (126) wirksam ist.
28. Kühlanordnung nach einem der Ansprüche 22 bis 27, bei welcher der Teil (104) des Verdampfers (100), an welchem die konkave Fläche (114) vorgesehen ist, als Fließpressteil aus einem wärmeleitenden Werkstoff nach Art von Kupfer, Aluminium oder Silber ausgebildet ist.
29. Kühlanordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welcher der Verdampfers (100) eine Baugruppe (102) aufweist, an der Kältemittelinlass (112) und Kältemittelauslass (126) vorgesehen sind.
30. Kühlanordnung nach Anspruch 29, bei welcher die Baugruppe (102) als Formstück aus Kunststoff ausgebildet ist.
31. Kühlanordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welcher der Verdampfer (100) aus mindestens zwei Teilen (102, 104) zusammengesetzt ist, welche flüssigkeitsdicht miteinander verbunden sind.
32. Kühlanordnung nach Anspruch 31, bei welcher eine Anordnung (140) zur Befestigung des Verdampfers (100) in mindestens einem dieser Teile (102, 104) integriert ist.
33. Kühlanordnung nach Anspruch 31 oder 32, bei welcher die Teile (102, 104) mittels einer Radialdichtung (134) gegeneinander abgedichtet sind.

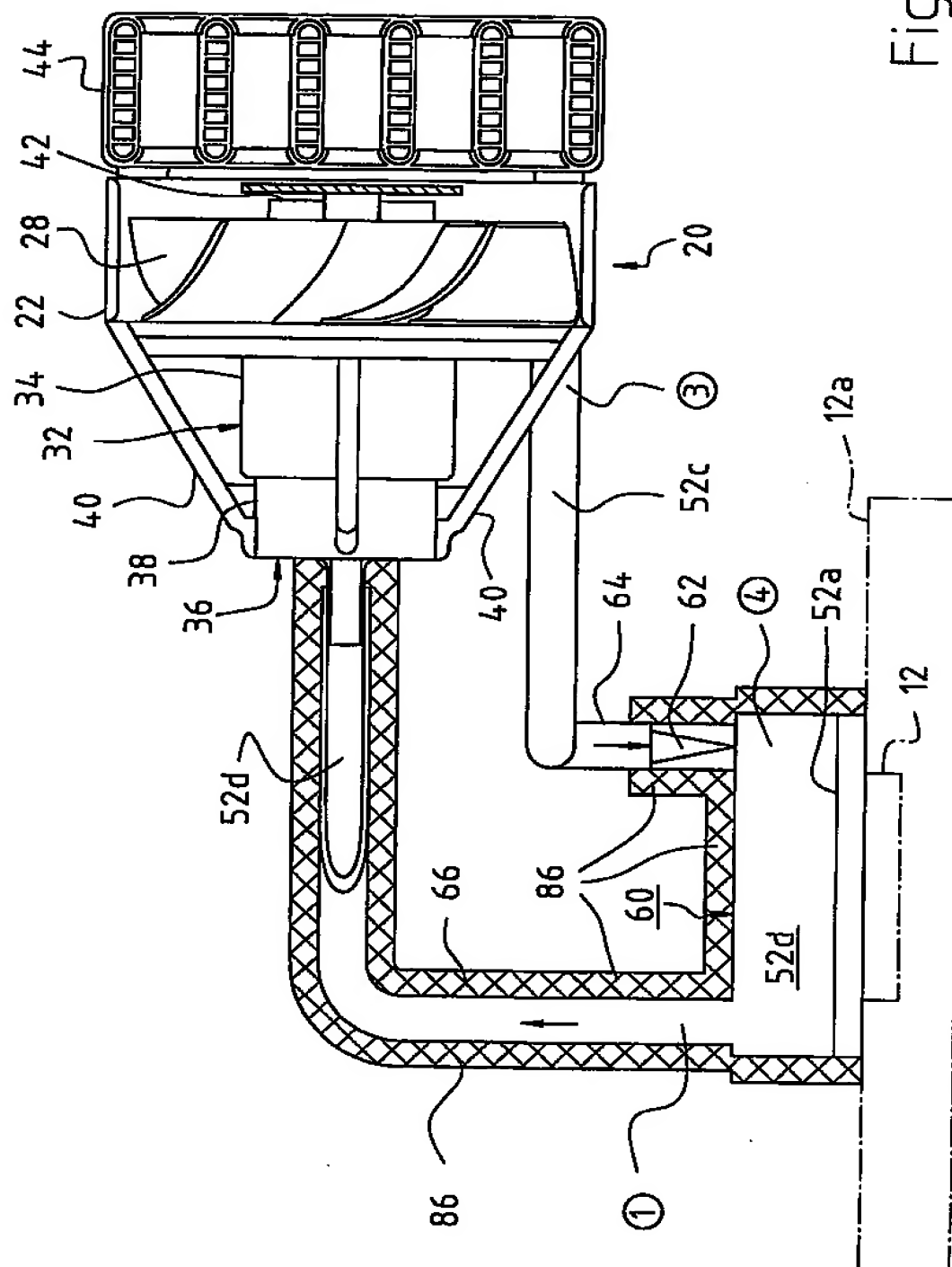


Fig. 1

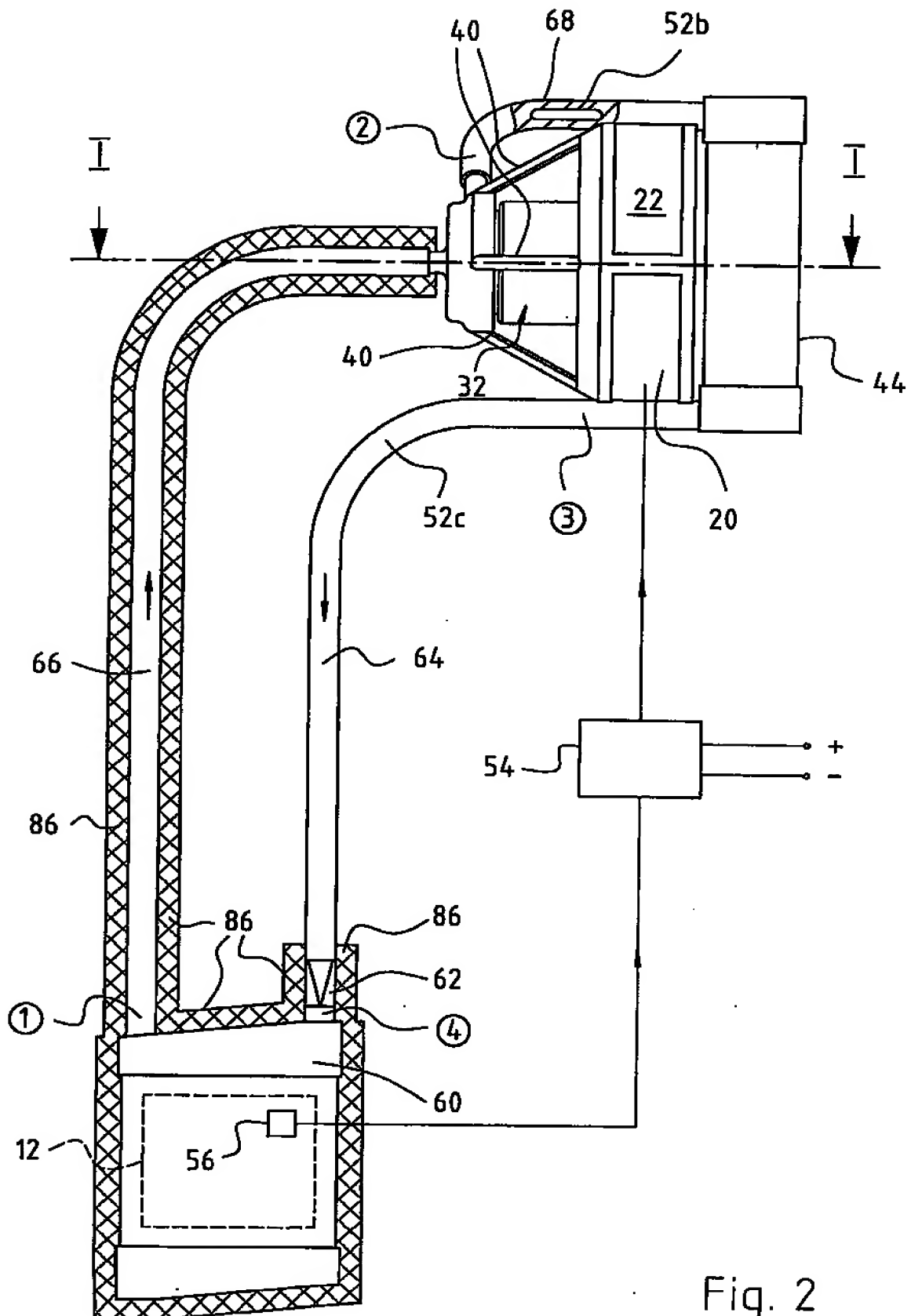


Fig. 2

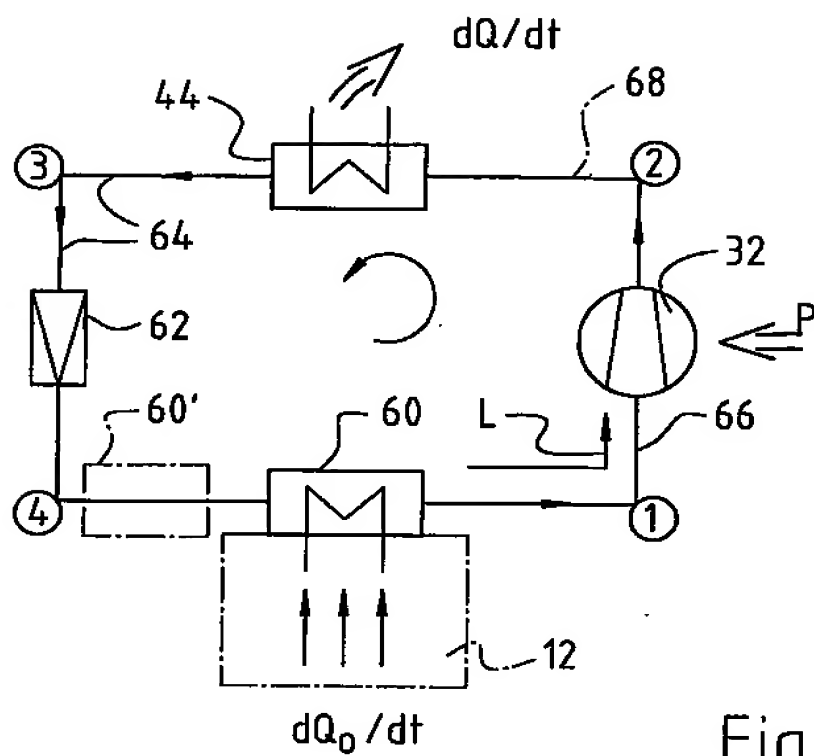


Fig. 3

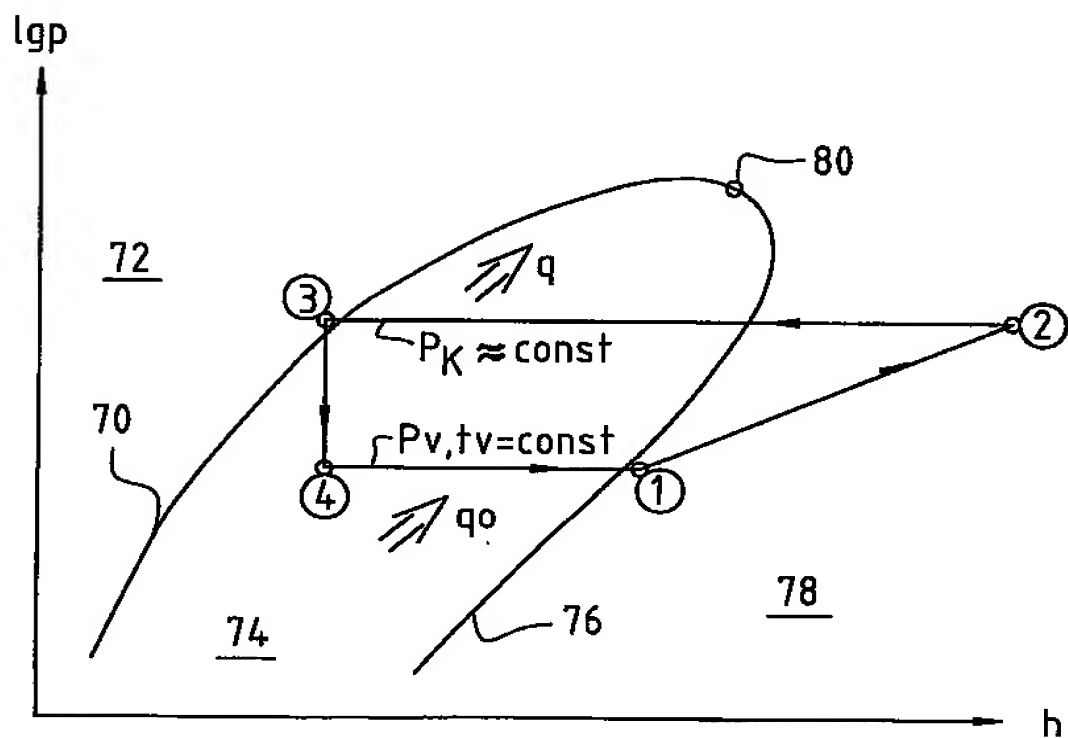


Fig. 4

4 / 5

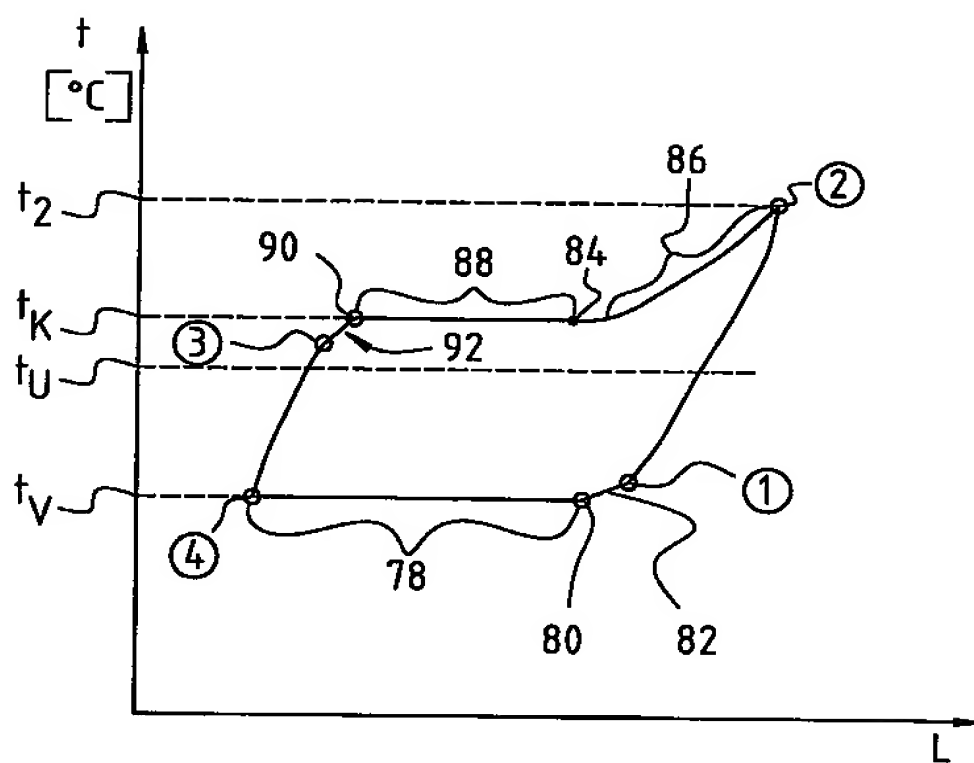


Fig. 5

5 / 5

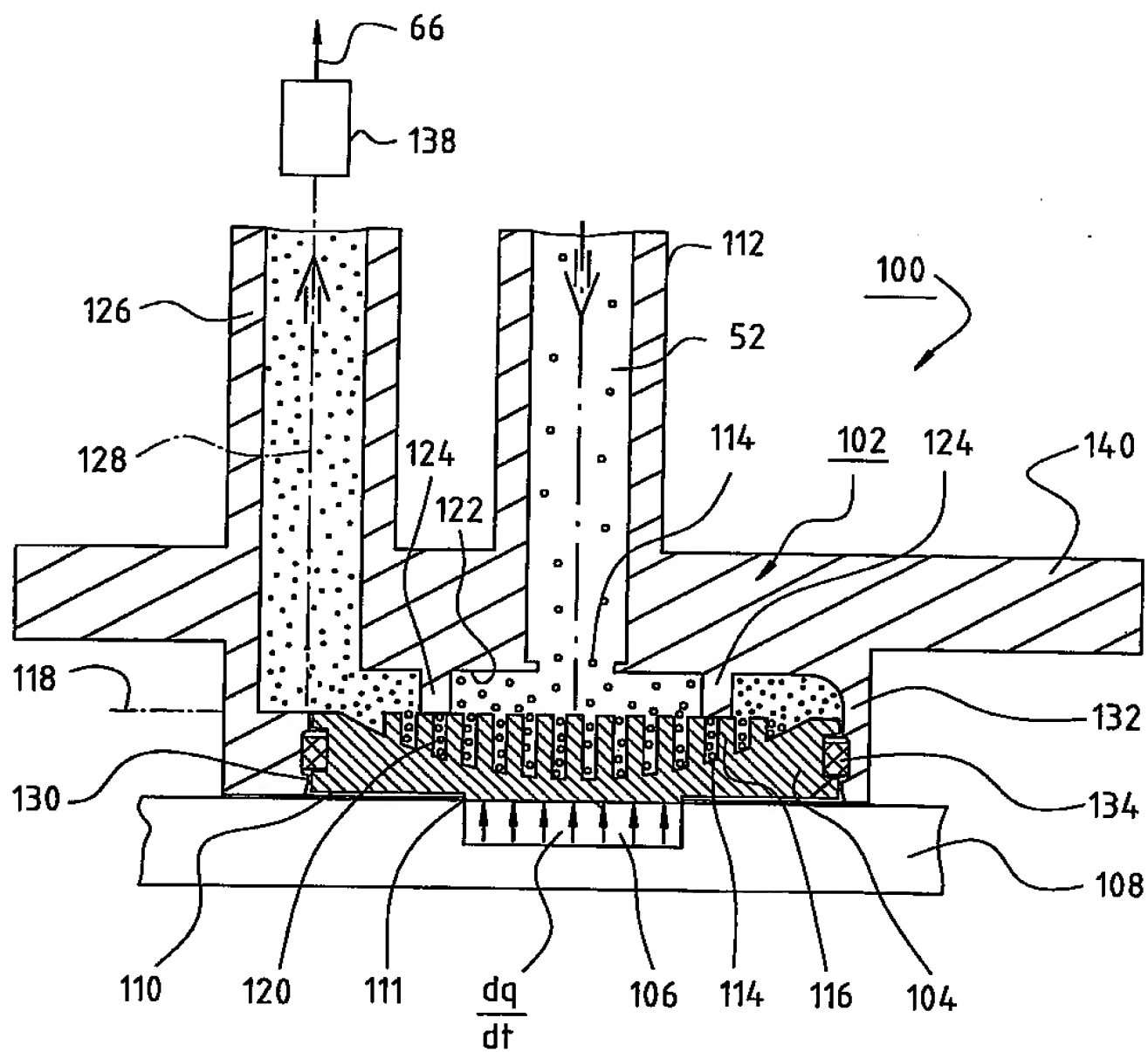


Fig. 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2005/002832

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 H05K7/20 H01L23/44

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 H05K H01L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DE 43 30 925 A1 (RITTAL-WERK RUDOLF LOH GMBH & CO KG, 35745 HERBORN, DE) 23 March 1995 (1995-03-23) column 1, line 1 - line 11 column 2, line 29 - line 52 figure 1	1,5-8
X	DE 43 30 923 C1 (RITTAL-WERK RUDOLF LOH GMBH & CO KG, 35745 HERBORN, DE) 23 March 1995 (1995-03-23) column 1, line 3 - line 33 column 3, line 23 - line 45; figures 1,2	1,5-8
X	DE 32 06 059 A1 (SIEMENS AG; SIEMENS AG, 1000 BERLIN UND 8000 MUENCHEN, DE) 8 September 1983 (1983-09-08) page 10, line 10 - page 11, line 22 figure 1	5
	----- -/-	

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the International filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- *&* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

23 June 2005

Date of mailing of the international search report

04/07/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Miot, F

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2005/002832

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 91/15722 A (MASUR, WALTER) 17 October 1991 (1991-10-17) page 11, line 10 - page 15, line 33 figures 1,2	2-4
A	US 2002/075652 A1 (BERCHOWITZ DAVID M) 20 June 2002 (2002-06-20) claim 1 figures 1-3	1,5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP2005/002832

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 4330925	A1	23-03-1995	NONE
DE 4330923	C1	23-03-1995	NONE
DE 3206059	A1	08-09-1983	NONE
WO 9115722	A	17-10-1991	WO 9115722 A1 17-10-1991
			DE 59007469 D1 17-11-1994
			DK 523035 T3 18-04-1995
			EP 0523035 A1 20-01-1993
US 2002075652	A1	20-06-2002	JP 2002168547 A 14-06-2002

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 H05K7/20 H01L23/44

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RESEARCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 H05K H01L

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	DE 43 30 925 A1 (RITTAL-WERK RUDOLF LOH GMBH & CO KG, 35745 HERBORN, DE) 23. März 1995 (1995-03-23) Spalte 1, Zeile 1 - Zeile 11 Spalte 2, Zeile 29 - Zeile 52 Abbildung 1	1,5-8
X	DE 43 30 923 C1 (RITTAL-WERK RUDOLF LOH GMBH & CO KG, 35745 HERBORN, DE) 23. März 1995 (1995-03-23) Spalte 1, Zeile 3 - Zeile 33 Spalte 3, Zeile 23 - Zeile 45; Abbildungen 1,2	1,5-8

-/--



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

E Älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

L Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

O Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

P Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

T Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

Y Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

Z Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

23. Juni 2005

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

04/07/2005

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Beauftragter

Miot, F

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	DE 32 06 059 A1 (SIEMENS AG; SIEMENS AG, 1000 BERLIN UND 8000 MUENCHEN, DE) 8. September 1983 (1983-09-08) Seite 10, Zeile 10 - Seite 11, Zeile 22 Abbildung 1 -----	5
A	WO 91/15722 A (MASUR, WALTER) 17. Oktober 1991 (1991-10-17) Seite 11, Zeile 10 - Seite 15, Zeile 33 Abbildungen 1,2 -----	2-4
A	US 2002/075652 A1 (BERCHOWITZ DAVID M) 20. Juni 2002 (2002-06-20) Anspruch 1 Abbildungen 1-3 -----	1,5

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2005/002832

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
DE 4330925	A1	23-03-1995	KEINE		
DE 4330923	C1	23-03-1995	KEINE		
DE 3206059	A1	08-09-1983	KEINE		
WO 9115722	A	17-10-1991	WO	9115722 A1	17-10-1991
			DE	59007469 D1	17-11-1994
			DK	523035 T3	18-04-1995
			EP	0523035 A1	20-01-1993
US 2002075652	A1	20-06-2002	JP	2002168547 A	14-06-2002